УДК 621.382.323

## Э.Ю.Козловский, А.М.Осипов

# НИЗКОБАРЬЕРНЫЕ ДИОДЫ ШОТКИ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Институт электронных и информационных систем НовГУ

Results of experimental approbation of mode of Schottky-barrier effective level reducing on gallium arsenide under semiconductor doping level changing in the near-surface region are represented.

# Введение

Для арсенида галлия с умеренной концентрацией электронов (меньше  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) барьер Шотки (БШ) имеет высоту в пределах 0,8-1 эВ для широкого ряда распространенных в производственной практике металлов (Au, Ti, W, Pt и др.). Однако для целого ряда случаев применения диодов Шотки на СВЧ желательно уменьшение эффективной высоты барьера Шотки до уровня порядка 0,2 эВ при сохранении коэффициента неидеальности  $n \leq 2$ .

Уменьшение высоты БШ может быть достигнуто несколькими способами:

1) применение узкозонных полупроводников InP, InGaAs и др.;

2) химическая или плазменная обработка поверхности GaAs перед формированием барьерной металлизации;

 управление уровнем легирования полупроводника в приповерхностной области (непосредственно под барьерной металлизацией);

4) использование структур с б-легированием [1].



Рис.1. Эпитаксиальные структуры, используемые для изготовления ДБШ

Первый способ в значительной степени представляет научный интерес, но в настоящее время малоприменим в производственной практике, поскольку технология узкозонных материалов применительно к СВЧ электронике достаточно мало изучена.

Второй способ прост в реализации, но имеет крайне низкую воспроизводимость и малый диапазон регулирования высоты БШ. Кроме того, поскольку химические и плазменные обработки уменьшают высоту барьера за счет изменения плотности поверхностных состояний, данный способ обладает нестабильностью во времени, что также негативно отражается на параметрах прибора и его надежности в целом.

Наиболее перспективными для снижения высоты барьера являются третий и четвертый способы.

#### Методика и эксперимента и результаты

Транспортные характеристики контактов металл-полупроводник, изготовленных в чистых эпитаксиальных или сверхвысоковакуумных условиях, являются хорошо изученными. Токоперенос в основном определяется параметрами потенциального барьера Шотки в полупроводнике вблизи границы с металлом.

В некоторых пределах высоту барьера можно изменять путем сильного легирования полупроводника. При исследовании возможности управления высотой БШ через сильное легирование полупроводника были опробованы типы структур, представленные на рис.1. Структуры типов 1-3 представляют собой случай сильного объемного легирования полупроводника. Структура типа 4 (со скрытым  $n^+$ -слоем) является «классической» при изготовлении ДБШ. В табл.1 представлены параметры  $n^+$ - и *n*-слоев этих структур.

На структурах типов 1-4 был сформирован тестовый БШ с топологией, представленной на рис.2.



Рис.2. Топология барьера Шотки

Общая площадь БШ для каждой тестовой структуры составила 64 мкм<sup>2</sup>. В качестве барьерной металлизации использовалась система V-Mo-Au. Такая система обладает термостойкостью и отличается малой деградацией параметров во времени при существенной электрической нагрузке.

На полученных тестах БШ были сняты ВАХ барьера при прямом смещении. По экспериментальным данным с использованием методики Фукуи [2] была выполнена экстракция параметров БШ на участке малых токов (до 2 мА), что позволило исключить влияние сопротивления базы диода.

В табл.2 и 3 приведены значения параметров БШ для структур с различной толщиной барьерного слоя при различном уровне объемного легирования. Табл.2 позволяет оценить влияние уровня легирования и толщины  $n^+$ -слоя на параметры БШ. В табл.3 приведено сравнение «классической» структуры для ДБШ с экспериментальными структурами с высоким уровнем объемного легирования. На рис.3 и 4 представлены ВАХ ДБШ для исследованных структур.

Таблица 1

Тип	Концентрация	Толщина	Концентрация	Толщина
структуры	$n^+, cm^{-3}$	$n^+$ , HM	$n, cm^{-3}$	<i>n</i> , нм
1	$8 \cdot 10^{18}$	200	—	—
2	$8.10^{18}$	400		_
3	$2 \cdot 10^{18}$	250	$1,8.10^{17}$	250
4	$8.10^{18}$	200	$1 \cdot 10^{17}$	100

Параметры  $n^+$ - и *n*-слоев эпитаксиальных структур

Таблица 2

Параметр БШ	Тип 1 ( <i>n</i> <sup>+</sup> , 200 нм, 8·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup> )	Тип 2 ( <i>n</i> <sup>+</sup> , 400 нм, 8·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup> )	Тип 3 (n <sup>+</sup> , 250 нм, 2·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup> )
Коэффици- ент неиде- альности <i>п</i>	2,05	2,10	1,49
Высота барь- ера ф <sub>БШ</sub> , эВ	0,42	0,41	0,64

Параметры БШ Ме-*n*<sup>+</sup> структур (высокий уровень объемного легирования)

Таблица 3 Параметры БШ Ме-*n* и Ме-*n*<sup>+</sup> структур

Параметр БШ	Тип 4 ( <i>n</i> , 100 нм, 1·10 <sup>17</sup> см <sup>-3</sup> )	Тип 3 ( <i>n</i> <sup>+</sup> , 250 нм, 2·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup> )	Тип 1 ( <i>n</i> <sup>+</sup> , 200 нм, 8·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup> )
Коэффици- ент неиде- альности <i>п</i>	1,09	1,49	2,05
Высота барь- ера ф <sub>БШ</sub> , эВ	0,86	0,64	0,42



Рис.3. Вольтамперные характеристики БШ Ме-*n*<sup>+</sup> структур (высокий уровень объемного легирования)



Рис.4. Вольтамперные характеристики БШ Ме-*n* и Ме-*n*<sup>+</sup> структур

Более эффективного снижения высоты барьера можно достигнуть, используя приповерхностное легирование полупроводника. С этой целью в качестве барьерной металлизации выбрана система Ge-Au. Подслой германия выступает в качестве легирующей примеси. При высокотемпературном отжиге происходит диффузия германия вглубь полупроводника, создавая вблизи поверхности область с высоким содержанием легирующей примеси. При этом следует подчеркнуть, что режим отжига (температура и время процесса) существенным образом может повлиять на параметры барьера. В пределе, при определенном температурном воздействии и временном интервале, система Ge-Au утрачивает свойства БШ (выпрямляющего контакта) и преобразуется в омический контакт с высоким контактным сопротивлением и нелинейностью. В табл.4 приведены параметры ДБШ с затворной металлизацией Ge-Au после различных режимов отжига, а на рис.5 представлены ВАХ ДБШ для структур с приповерхностным легированием.

Таблица 4

Параметры БШ для структур с приповерхностным легированием

		Тип 3+Ge			
Параметр БШ	Тип 3	До отжига	300°С, 30 мин	300°С, (30+20) мин	300°С (30+20) мин + 330°С 10 мин
Коэффици- ент неиде- альности <i>п</i>	1,49	1,48	1,85	2,03	2,19
Высота барь- ера ф <sub>БШ</sub> , эВ	0,64	0,52	0,32	0,31	0,28





\_\_\_\_ тип 3 + Ge (300°С (30 +20)мнн + 330°С 10 мнн)

Рис.5. Вольтамперные характеристики БШ для структур с приповерхностным легированием

Таблица 5

Параметр БШ	Тип 4	Тип 3	Тип 1	Тип 3+Ge 300°С (30+20) мин
Коэффициент неидеальности <i>п</i>	1,09	1,49	2,05	2,03
Высота барьера ф <sub>БШ</sub> , эВ	0,86	0,64	0,42	0,31

Сводная таблица параметров БШ для структур с различным уровнем легирования



Рис.6. Вольтамперные характеристики БШ для структур с различным уровнем легирования

### Обсуждение результатов

Типовые значения параметров БШ на структуре типа 4 («классическая» структура) составляют n = 1,09 и  $\phi_{\text{БШ}} = 0,86$  эВ.

Из табл.2 и 3 видно, что использование объемного легирования полупроводника (больше  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) позволяет уменьшить высоту барьера до 0,4-0,65 эВ, однако при этом увеличивается коэффициент неидеальности до 1,5-2,1. Причем чем сильнее легирован полупроводник, тем меньше высота барьера и выше коэффициент неидеальности. Уменьшение высоты барьера обусловлено экранирующим действием  $n^+$ слоя. Поскольку при реализации ДБШ на сильнолегированном полупроводнике увеличивается вклад туннельной составляющей тока, то соответственно увеличивается и показатель неидеальности барьера, используемый при описании БШ исходя из термополевой эмиссии электронов. Толщина  $n^+$  не влияет на параметры барьера.

Данные табл.4 показывают, что более эффективным способом уменьшения высоты БШ является локальное приповерхностное легирование. При этом в приповерхностной области (на расстоянии нескольких нанометров от поверхности) возникает область, имеющая существенно более высокий уровень легирования, чем исходный материал, усиливая эффект экранирования поля контакта еще больше, чем в случае объемного легирования. Однако, как видим, параметры барьера изменяются при температурном воздействии. Высота барьера уменьшается из-за увеличения содержания германия в приповерхностном слое за счет диффузии, а коэффициент неидеальности возрастает в результате увеличения туннельной составляющей тока. В случае, когда ширина потенциального барьера становится критически малой (при температуре 330°C) в результате обогащения германием, эффект туннелирования становится преобладающим, и БШ утрачивает выпрямляющие свойства.

В табл.5 и на рис.6 приведены данные об уменьшении высоты БШ при использовании различных структур и барьерной металлизации.

Структуры с приповерхностным легированием, подвергнутые отжигу при температуре 300°С, демонстрируют наименьшую высоту барьера, однако положительный эффект от уменьшения высоты БШ несколько снижается увеличением коэффициента неидеальности. Для возможности практического применения необходимо добиваться соотношения n < 1,5.

Кроме того для структур подобного типа наблюдается некоторое увеличение барьерной емкости ДБШ. Как известно, величина этой емкости определяется концентрацией примеси в полупроводнике, на котором формируется БШ. Зависимость носит харак-

тер  $\sim \sqrt{N}$ , где N — концентрация легирующей примеси. Увеличение емкости БШ носит паразитный характер и ухудшает высокочастотные свойства ДБШ.

### Выводы

Для реализации ДБШ с малым значением эффективной высоты барьера Шотки в производственной практике наиболее простым является способ управления высотой БШ через сильное легирование полупроводника.

Наиболее эффективное снижение высоты барьера наблюдается при использовании локального приповерхностного легирования германием. Однако для БШ, полученного таким способом, характерны относительно высокие значения коэффициента неидеальности и барьерной емкости, что негативно сказывается на возможности использования подобных ДБШ на СВЧ.

С точки зрения практического применения подобные ДБШ могут быть использованы в целом ряде СВЧ приборов — таких, как ограничительные диоды и защитные устройства.

Шашкин В.И., Мурель В.И., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. // Физика и техника полупроводников. 2002. Т.36. Вып.5. С.537-542.

<sup>2.</sup> Fukui H. // The Bell System Technical Journal. March 1979. P.771-797.